

На правах рукописи

Свалов Андрей Владимирович

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ АМОРФНЫХ И
МНОГОСЛОЙНЫХ ФЕРРИМАГНИТНЫХ ПЛЁНОК ГАДОЛИНИЙ-
КОБАЛЬТ ВБЛИЗИ СОСТОЯНИЯ МАГНИТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург 2002

Работа выполнена в Уральском государственном университете им.А.М.Горького в отделе магнетизма твёрдых тел НИИ физики и прикладной математики.

Научные руководители: заслуженный деятель науки РФ,
член-корреспондент РАЕН,
доктор физико-математических наук,
профессор Г.С. Кандаурова

кандидат физико-математических наук,
доцент В.О. Васьковский

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор А.С. Ермоленко

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
С.М. Задворкин

Ведущая организация: Институт физики металлов УрО РАН

Защита состоится _____ июня 2002 года в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите
диссертаций на соискание учёной степени доктора физико-математических
наук в Уральском государственном университете им. А.М.Горького по
адресу: 620083, Екатеринбург, пр. Ленина, 51, ком. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уральского
государственного университета им. А.М.Горького.

Автореферат разослан _____ мая 2002 года

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Н.В. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Тонкие магнитные пленки привлекают к себе внимание исследователей последние несколько десятилетий, причем внимание это постоянно возрастает. Изучение свойств пленок, сравнение их со свойствами объемных образцов позволяют получить более полное представление о природе магнетизма. Кроме того, магнитные пленки являются объектом практического интереса, который усилился после начала исследования многослойных магнитных систем. В таких структурах возможно присутствие как слоёв различных магнитных материалов, так и немагнитных прослоек, а свойства многослойных систем могут значительно отличаться от свойств любого из компонентов системы. Уже созданы материалы с новыми физическими свойствами, например, такими как гигантский магниторезистивный эффект, гигантский импеданс, туннельный гигантский магниторезистивный эффект.

Среди магнитных пленок можно выделить особый класс - пленки, содержащие редкоземельные элементы (РЗ) и переходные 3d металлы (ПМ). Это и аморфные пленки РЗ-ПМ, которые могут обладать перпендикулярной магнитной анизотропией с константой анизотропии $K_u \sim 10^5 \div 10^6$ эрг/см³, что делает возможным их применение в качестве элементов памяти [1], и композиционно-модулированные структуры, содержащие слои редкоземельных и 3d-переходных элементов, которые также могут использоваться в устройствах магнитооптической памяти или как составная часть спин-вентильных структур – основы для магниторезистивных считывающих головок компьютерных жестких дисков или датчиков скорости и положения движущихся объектов [2].

Кроме того, пленки, содержащие редкоземельные элементы и переходные 3d металлы, обладают уникальной возможностью получения ферримагнитных структур и варьирования их параметров в широких пределах. Особый интерес представляет состояние магнитной компенсации ферримагнетиков, где проявляются аномалии их магнитных свойств.

Для реализации магнитной компенсации и изменения её параметров подходящими объектами являются аморфные и многослойные пленки гадолиний – кобальт. В первом случае это обусловлено неограниченной взаимной растворимостью компонентов, во втором – возможностью изменять соотношение толщин слоев.

Из сказанного выше следует, что изучение аморфных и многослойных пленок, содержащих редкоземельные и переходные металлы, актуально как с научной, так и с практической точек зрения.

Цель работы

Выявление общих закономерностей и особенностей формирования магнитных свойств подрешёточных и слоистых ферримагнетиков вблизи состояния магнитной компенсации.

Задачи исследования

1. Разработка способов изготовления аморфных и слоистых плёночных объектов с редкоземельными компонентами методом высокочастотного распыления.
2. Исследование закономерностей магнитного упорядочения в слоистых ферримагнитных структурах на основе Gd и Co.
3. Определение источников и особенностей описания магнитной анизотропии естественных и искусственных слоистых ферримагнетиков вблизи состояния магнитной компенсации.

Научная новизна и результаты, выносимые на защиту

На основе слоёв Gd и Co синтезированы обменносвязанные плёночные структуры, которые характеризуются немонотонной температурной зависимостью спонтанной намагниченности и классифицируются как искусственные ферримагнетики. Показано, что температура магнитной компенсации (T_K) в таких плёнках зависит от соотношения толщин слоёв разного типа, периода слоистой структуры, толщины и материала немагнитных прослоек. Впервые в рамках предложенной модели неоднородного межслойного обмена дано феноменологическое описание спонтанной намагниченности многослойных плёнок типа Gd/Co в широком диапазоне температур для различных соотношений геометрических параметров слоистых структур.

Впервые выполнен систематический анализ особенностей магнитной анизотропии вблизи состояния магнитной компенсации аморфных плёнок Gd-Co и многослойных плёнок Gd/Co. Найдено, что многослойные плёнки имеют анизотропию типа плоскость лёгкого намагничивания, главным источником которой выступает анизотропия размагничивающих полей отдельных слоёв. Показано, что общим для обоих типов ферримагнетиков является немонотонное изменение константы магнитной анизотропии около температуры компенсации, которое следует считать эффективным, отражающим нарушение коллинеарности магнитных моментов подсистем Gd и Co в магнитном поле. Установлено, что в аморфных плёнках Gd-Co наличие конуса ОЛН, изменение угла его раствора от температуры и напряжённости магнитного поля имеют качественное и количественное объяснение в модели неоднородной плёнки, содержащей слои с перпендикулярной и плоскостной анизотропией.

В плёнках Gd-Co впервые обнаружена «вращающаяся» магнитная анизотропия. Её наиболее вероятной причиной является микрополосовая доменная структура.

Показано, что в искусственных ферромагнитных структурах типа Gd/Co наблюдаются индуцированные магнитным полем переходы из коллинеарной магнитной фазы в угловую магнитную фазу. Найдено, что критическое поле спин-ориентационного перехода имеет немонотонную температурную зависимость с минимумом около температуры компенсации и тем самым демонстрирует сходство с аналогичной характеристикой кристаллических ферромагнетиков.

Впервые установлены закономерности перестройки спектра ферромагнитного резонанса искусственных слоистых ферромагнетиков Gd/Co в области температур, включающей температуру компенсации T_K . Показано, что при температурах ниже и выше T_K в спектре присутствует одна резонансная линия. Вблизи T_K резонансный спектр имеет сложный характер, что может быть обусловлено нарушением коллинеарности магнитной структуры в высокочастотном магнитном поле.

Практическая значимость работы

На основе анализа аномалий в температурной зависимости вращающего момента в области магнитной компенсации предложен новый высокочувствительный способ регистрации неоднородностей состава аморфных плёнок Gd-Co.

Продемонстрирована возможность использования аморфных плёнок Gd-Co в составе двухслойных структур как материала для элементов памяти с магнитной записью и магниторезистивным считыванием информации, а многослойных плёнок с редкоземельными компонентами для создания магнитного смещения в спин-вентильных магниторезистивных структурах.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: Всесоюзный симпозиум по аморфному магнетизму (1986, Владивосток); Школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» (1992, Астрахань; июнь 1998, Москва); 14-th ICMFS (1994, Dusseldorf, Germany); 7th European Magnetic Materials and Applications Conference (Sept. 1998, Zaragoza, Spain); Magnetism of Nanostructured Phases (September 1998, San Sebastian, Spain); Workshop on Rare-Earth Magnets and their Applications (September 1998, Drezden, Germany); VIII International Seminar «Dislokation Structure and Mechanical Properties of Metals and Alloys» (March 1999, Ekaterinburg, Russia); Moscow International Symposium on Magnetism (June 1999, Moscow, Russia); European Conference «Physics of Magnetism-99» (June 1999, Poznan, Poland); Вторая объединённая конференция по магнитоэлектронике (февраль 2000, Екатеринбург); 5-я Всероссийская конференция «Физико-химия

ультрадисперсных (нано-) систем» (октябрь 2000, Екатеринбург); Euro-Asian symposium “Trends in magnetism” (March 2001, Ekaterinburg, Russia); Conference on Advanced Magneto-Resistive Materials (March 2001, Ekaterinburg, Russia); Soft Magnetic Materials Conference (September 2001, Bilbao, Spain);

Публикации

По теме диссертации опубликовано 17 статей и 1 описание патента. Список публикаций приведен в конце автореферата.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и списка цитированной литературы. Она содержит 163 страницы, включая 48 рисунков и 2 таблицы. В списке литературы приведено 128 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы общая цель и конкретные задачи работы, указаны основные результаты, выносимые на защиту.

Первая глава является обзорной. В ней излагаются имеющиеся в литературе сведения об особенностях структуры и магнитных свойств ферромагнитных аморфных и многослойных пленок, содержащих 3d-переходные металлы и редко-земельные элементы. На основе литературных данных обосновывается выбор объектов исследования, уточняется поставленная задача.

Во второй главе описаны методы получения образцов и проведения экспериментов.

Аморфные пленки Gd-Co и многослойные пленки Gd/Co были получены радиочастотным ионно-плазменным напылением в атмосфере аргона. В ряде случаев для предотвращения окисления оба типа пленок покрывались защитным слоем одного из следующих материалов: Si, SiO₂, Cu, Al. В качестве подложек использовались покровные стекла и пластины монокристаллического кремния. По данным рентгеновских и электронно-микроскопических исследований пленки Gd-Co были аморфны. Слоистый характер многослойных пленок типа Gd/Co был подтвержден малоугловым рентгеновским анализом.

Большая часть экспериментальных результатов, представленных в данной работе, получена с помощью вращательного анизометра. К достоинствам этой методики следует отнести возможность определения как намагниченности, так и констант анизотропии в разных геометриях (внешнее поле вращается в плоскости образца или в плоскости,

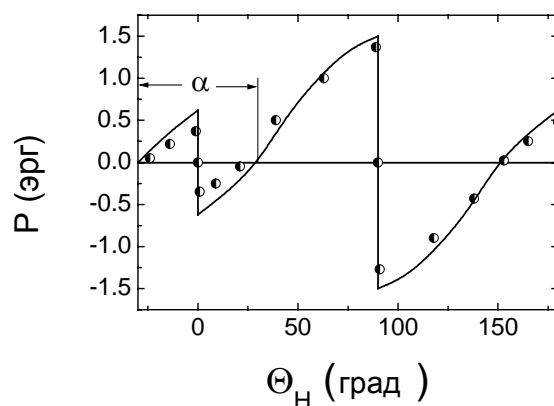
перпендикулярной плоскости образца), возможность температурных измерений, оперативность и простота в обслуживании, высокая чувствительность, что особенно важно при исследовании образцов малого объема.

В процессе работы на ряде образцов были проведены температурные измерения петель гистерезиса с помощью магнитооптического эффекта Керра, вибромагнитометра и СКВИД-магнитометра. Для нескольких пленок Gd/Co были измерены спектры ферромагнитного резонанса. Магниторезистивные свойства измерялись мостовым методом на полосках $10 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$.

В третьей главе изложены результаты исследования аморфных ферромагнитных пленок Gd-Co. Известно, что неоднородность состава по толщине пленок может оказывать существенное влияние на их магнитные свойства. В частности, ранее было показано, что неоднородности типа «компенсационная поверхность» приводят к аномалиям в температурной зависимости вращающего момента в непосредственной близости от температуры компенсации. Нами обнаружено, что температурный интервал существования этих аномалий зависит от величины внешнего магнитного поля и его ориентации относительно плоскости образца. На этой основе предложен новый высокочувствительный способ регистрации неоднородностей состава аморфных плёнок Gd-Co.

Однако только за счет неоднородности химического состава пленок невозможно объяснить конусный характер магнитной анизотропии и наблюдаемое существенное снижение константы перпендикулярной анизотропии вблизи температуры компенсации. Реальными факторами, которые усложняют поведение пленок Gd-Co в магнитном поле в окрестности T_k могут быть: неоднородность пленок по характеру магнитной анизотропии, нарушение коллинеарности ферромагнитно упорядоченных подрешеток кобальта и гадолиния (“изгиб” подрешеток), парапроцесс в подрешетке гадолиния, приводящий к сильной температурной зависимости намагниченности даже в области низких температур. В работе проанализирован каждый из этих факторов в отдельности.

Конусный характер анизотропии удалось описать в рамках модели пленки, состоящей из двух слоев, разделенных бесконечно тонкой границей. Основной слой имеет толщину l_{oc} , намагниченность M_{oc} , константу одноосной перпендикулярной анизотропии K_u . Константа K_u включает в себя как наведенную анизотропию, так и анизотропию формы пленки. Поверхностный (окисленный) слой имеет толщину l_{nc} , намагниченность M_{nc} и магнитную анизотропию, обусловленную только анизотропией формы слоя с константой $K_{nc} = -2\pi M_{nc}^2$. Между слоями существует обменное и магнитостатическое взаимодействие, но энергия его мала по сравнению с энергией анизотропии каждого из слоев. Из этого



условия следует, что вектор M_{oc} ориентирован близко к нормали, а M_{nc} - в плоскости пленки. Модель содержит несколько параметров, характеризующих пленку, часть из них была определена из кривых намагничивания, часть пришлось постулировать. В итоге удалось получить хорошее согласие результатов расчета и эксперимента при описании кривых вращающих моментов КВМ (рис.1), зависимости вращающего момента от напряженности поля в T_k (рис.2, кривая 1), зависимости угла раствора конуса осей легкого намагничивания α от температуры и напряженности поля. При этом не была объяснена наблюдаемая немонотонная зависимость $K_u(T)$. Это оказалось возможным сделать только путем учета нарушения коллинеарности магнитных моментов подсистем Gd и Co в магнитном поле. Было также показано, что только в больших полях возможен заметный вклад во вращающий момент как изгиба подрешеток (рис.2, кривая 2), так и парапроцесса в подрешетке гадолиния (рис.2, кривая 3).

Окисленный слой оказывает влияние и на процесс спиновой переориентации (СП), т.е. изменение эффективного характера магнитной анизотропии пленки от перпендикулярной к анизотропии типа плоскость легкого намагничивания. Нами было показано, что на образцах без окисленного слоя СП происходит практически скачкообразно (рис.3, кривая 1). При наличии окисленного слоя, созданного путем отжига пленки на воздухе, СП проходит в определенном интервале температур через состояние, характеризующее конусом легкого намагничивания КЛН (рис.3, кривая 2). Данный процесс был проанализирован теоретически на примере пленки, которая обладает перпендикулярной

Рис.1. Экспериментальная (точки) и теоретическая (линия) кривые вращающих моментов для аморфной пленки $Gd_{18}Co_{82}$.

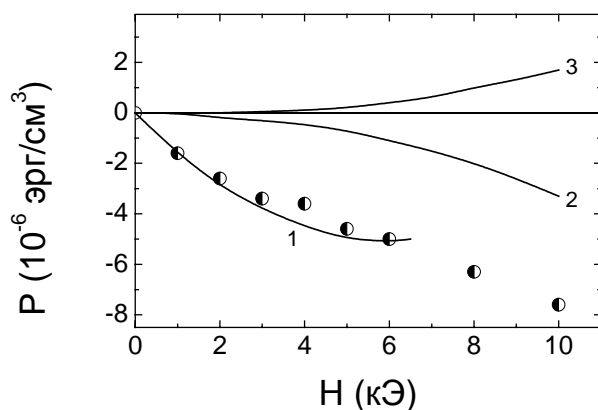


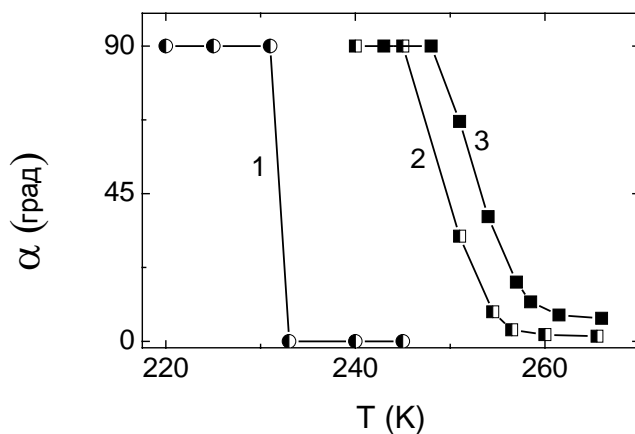
Рис. 2. Экспериментальная (точки) и теоретические зависимости вращающего момента от напряженности поля в T_k для различных моделей намагничивания: 1 – двухслойная пленка; 2 – изгиб подрешеток; 3 – парапроцесс.

анизотропией, но в то же время на одной из поверхностей намагниченность жестко закреплена в плоскости пленки. Вблизи

Рис. 3. Температурные зависимости угла α между нормалью к плоскости пленки и образующей КЛН для пленки $Gd_{22}Co_{78}$, покрытой защитным слоем Al, в исходном состоянии (1) и после низкотемпературного отжига (2, 3). Величина поля измерения составляла 5 кЭ (1, 2) и 10 кЭ (3).

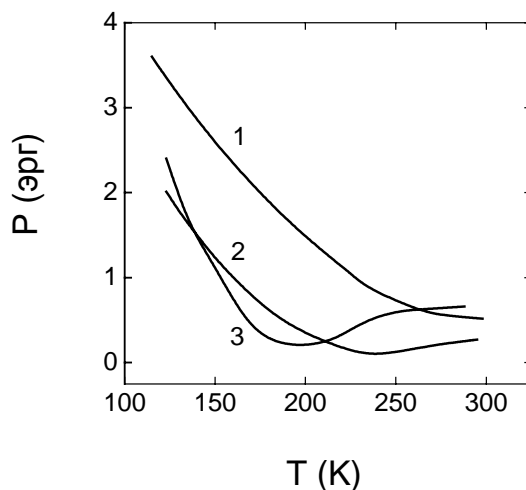
этой поверхности формируется переходная область типа 90° доменной границы. Ширина этой границы во многом определяется эффективной анизотропией основного слоя, складывающейся из анизотропии формы и наведенной перпендикулярной анизотропии.

При снижении эффективной анизотропии с температурой происходит увеличение ширины приповерхностной доменной границы (ПДГ). Результирующая намагниченность в ПДГ отклонена от нормали к пленке. Поэтому с ростом ширины границы, то есть с увеличением ее объемной доли, результирующая намагниченность всего образца будет постепенно изменять свою ориентацию. Таким образом, спиновая переориентация представляется как процесс изменения ширины ПДГ. В рамках данной модели удалось описать зависимость характера СП от параметров поверхностного слоя, а также ориентации и величины магнитного поля, в присутствии которого происходит СП (см., например, рис.3, кривые 2 и 3).



В аморфных пленках Gd-Co нами было обнаружено такое интересное явление как вращающаяся магнитная анизотропия в плоскости образца, ось легкого намагничивания которой задается приложением к пленке достаточно большого магнитного поля. Ранее это явление наблюдалось на пленках 3d-переходных металлов и их сплавов. Одна из наиболее известных точек зрения на природу вращающейся анизотропии состоит в том, что в закритических пленках, толщина которых больше некоторой критической, а фактор качества $Q = K_u/2\pi M_s^2 < 1$, за возникновение вращающейся анизотропии ответственна микрополосовая доменная структура – страйп-структура. При повороте слабого магнитного поля в плоскости пленки ориентация полосовых доменов (страйп-доменов) не меняется, а меняется лишь направление намагниченности в доменах. Если приложить сильное магнитное поле, можно изменить направление полосовых доменов, и тем самым изменить положение ОЛН [3]. О наличии в пленках закритического состояния, а значит и о существовании в образцах страйп-доменной структуры можно судить как на основании непосредственного наблюдения доменов, так и по магнитным характеристикам пленок. Нами исследовались температурные зависимости намагниченности насыщения и констант перпендикулярной и вращающейся анизотропии K_{ep} для образцов различных составов, обладающих разными T_k . Было обнаружено, что вращающаяся анизотропия неразрывно связана с наличием в образцах закритического состояния. Получено качественное совпадение экспериментальных и рассчитанных по известной формуле [3] зависимостей $K_{ep}(T)$.

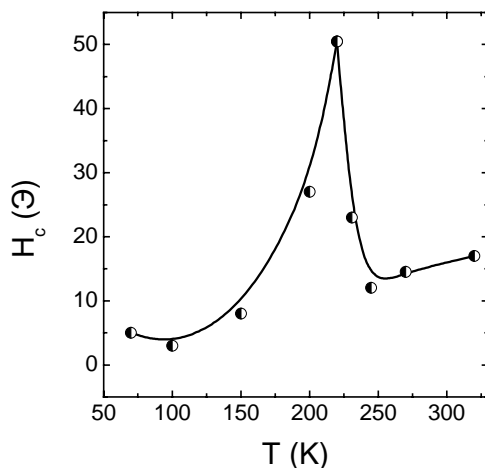
В конце главы показана возможность использования в качестве материала для ячеек памяти с магниторезистивным считыванием двухслойной пленки Fe15Co20Ni65/GdCo. Подрешетки 3d-металлов из разных слоев связаны положительным, а 3d-металлы и Gd - отрицательным обменным взаимодействием. Результирующий магнитный момент ферромагнитной пленки Gd₃₀Co₇₀ при комнатной температуре определяется преобладающим магнитным моментом подрешетки Gd и оказывается противонаправленным магнитному моменту слоя Fe15Co20Ni65. Таким образом, двухслойная пленка Fe15Co20Ni65/Gd₃₀Co₇₀ представляет собой исходную структуру для элементов с «квазизамкнутым» магнитным потоком, устойчивость



магнитного состояния которых обеспечивается не только магнитостатическим, но и обменным взаимодействием между слоями.

В четвертой главе представлен анализ магнитных свойств искусственных ферромагнетиков, а именно, многослойных пленок типа Gd/Co.

Наши эксперименты показали, что пленкам Gd/Co присуще такое характерное для ферромагнетиков свойство как состояние магнитной компенсации, о чем свидетельствуют минимумы на температурных зависимостях вращающего момента P (рис.4) и максимум коэрцитивной силы вблизи T_K (рис.5). Однако оказалось, что ход кривых $P(T)$ и $M_s(T)$ определяется не только номинальным составом образцов (соотношением толщин слоёв), но и периодом структуры L . Это, скорее всего, связано с тем, что температурная зависимость намагниченности слоёв Gd определяется не только собственным обменным взаимодействием, но и воздействием со стороны слоёв Co. Это воздействие отрицательно и, по-



видимому, довольно быстро спадает от поверхности к центру слоёв Gd. Подтверждением справедливости этой гипотезы является тот факт, что введение между слоями Gd и Co немагнитной прослойки Cu или Si уменьшает влияние кобальта на гадолиний, что приводит к более резкой температурной зависимости Gd и уменьшению величины T_K . Причем

введение Si оказывает более сильное воздействие на межслойный обмен, чем Cu. Это может быть связано с разным типом проводимости материалов прослойки.

Известно, что магнитные свойства аморфных плёнок Gd-Co довольно хорошо описываются теорией молекулярного поля, исходящей из однородного распределения атомов в материале [4]. Мы предприняли попытку распространить такой упрощенный вариант теории на случай слоистых плёночных структур. Предполагалось, что все атомы Co находятся только в собственном и одинаковом по величине молекулярном поле H_l . В слоях Gd молекулярное поле H_2 кроме однородной собственной составляющей имеет еще компоненту, создаваемую слоями Co. Последняя экспоненциально убывает по мере удаления от любой

Рис. 4. Температурные зависимости вращающего механического момента P для пленок Gd/Co с разным периодом слоистой структуры: 1 – 88 Å; 2 – 105 Å; 3 – 130 Å.

Рис. 5. Температурная зависимость коэрцитивной силы для пленки $\{Gd(75\text{Å})/Co(30\text{Å})\}_{20}$.

из поверхностей кобальтовых слоёв. Спонтанная намагниченность плёночной структуры $M_s(T)$ складывается из составляющих кобальтовой и гадолиниевой подсистем, температурный ход которых задаётся функцией Бриллюэна $B(x)$ соответствующего аргумента. В рамках такой модели удалось описать ход кривых $M_s(T)$, а также зависимости $T_K(L)$ и $T_K(L_{Cu,Si})$, измеренные на образцах с разными толщинами магнитных слоев и немагнитных прослоек.

Было обнаружено, что пленки типа Gd/Co обладают еще одним характерным свойством классических ферромагнетиков – возможностью трансформации магнитной структуры под действием внешнего магнитного поля. При намагничивании коллинеарное расположение намагниченностей двух подсистем может нарушаться, и в ферромагнетике возникает так называемая угловая магнитная фаза. Экспериментальные данные были получены при помощи меридионального эффекта Керра, который весьма чувствителен к изменению магнитной структуры образца, а также путём измерений намагниченности на СКВИД магнитометре для пленки $\{Co(30\text{Å})/Si(5\text{Å})/Gd(75\text{Å})/Si(5\text{Å})\}$ с $T_K = 118$ К. При достижении некоторого значения внешнего поля H_t на кривых намагничивания наблюдается излом, который можно трактовать как переход в неколлинеарное состояние. По результатам выполненных экспериментов построена фазовая H - T диаграмма. В интервале $5\text{ К} < T < T_K$ величина поля фазового перехода в неколлинеарное состояние H_t уменьшается с ростом температуры, а при $T_K < T < 140$ К поле перехода практически не изменяется с температурой.

Исследовалась в работе и магнитная анизотропия пленок типа Gd/Co. Было найдено, что пленки обладали плоскостной магнитной анизотропией,

причем порядок её величины, вычисленный из данных КВМ, оказался равным 10^5 эрг/см³, что заметно выше ожидаемого, если оценивать величину анизотропии формы образцов исходя из намагниченности насыщения пленок. Объяснить такое несоответствие можно, если предположить, что анизотропия пленок определяется анизотропией размагничивающих полей отдельных слоев. Характер кривых намагничивания в поле, перпендикулярном плоскости образца, измеренных на пленках Gd/Co как с немагнитной прослойкой, так и без нее, подтвердили данное предположение.

Интересные особенности свойств многослойных пленок Gd/Co были обнаружены нами не только в квазистатических магнитных полях, но и в полях высокочастотного диапазона. На образце $\{\text{Co}(30\text{\AA})/\text{Gd}(75\text{\AA})\}_{20}$ с $T_K = 240$ К были проведены измерения ферромагнитного резонанса в диапазоне температур 170 – 292 К при фиксированной частоте переменного магнитного поля (9,5 ГГц). Обнаружено, что характеристики ФМР в многослойной структуре очень чувствительны к изменению температуры: при температурах ниже и выше T_K в спектре присутствует одна резонансная линия, вблизи T_K резонансный спектр имеет сложный характер, величины поля резонанса H_{res} при $T = 177$ К и $T = 292$ К отличаются почти в три раза. Оценки ответственной за наблюдаемый резонанс эффективной намагниченности M_{eff} показали, что при температурах выше T_K ферромагнитный резонанс пленок Gd/Co скорее всего определяется слоями Co, а интерпретацию низкотемпературных спектров нужно вести с позиции ферримагнитного резонанса, т.е. учитывая сложную магнитную структуру объектов.

В конце главы на примере многослойной структуры $\{\text{Co}(1\text{nm})/\text{Tb}(1\text{nm})\}_{16}/\text{Co}(5\text{nm})/\text{Cu}(2,5\text{nm})/\text{Co}(5\text{nm})$ показана возможность применения многослойных плёнок с редкоземельными компонентами для создания магнитного смещения в спин-вентильных магниторезистивных системах.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе слоёв Gd и Co синтезированы обменносвязанные плёночные структуры, которые характеризуются немонотонной температурной зависимостью спонтанной намагниченности и классифицируются как искусственные ферримагнетики. Показано, что температура магнитной компенсации в таких плёнках зависит от соотношения толщин слоёв разного типа, периода слоистой структуры, толщины и материала немагнитных прослоек. Впервые в рамках предложенной модели неоднородного межслойного обмена дано феноменологическое описание спонтанной намагниченности многослойных плёнок типа Gd/Co в широком диапазоне температур для различных соотношений геометрических параметров слоистых структур.

2. Впервые выполнен систематический анализ особенностей магнитной анизотропии вблизи состояния магнитной компенсации аморфных плёнок Gd-Co и многослойных плёнок Gd/Co. Найдено, что аморфные плёнки обладают перпендикулярной анизотропией, а многослойные плёнки имеют анизотропию типа плоскость лёгкого намагничивания, главным источником которой выступает анизотропия размагничивающих полей отдельных слоёв. Показано, что общим для обоих типов ферромагнетиков является немонотонное изменение константы магнитной анизотропии около температуры компенсации, которое следует считать эффективным, отражающим нарушение коллинеарности магнитных моментов подсистем Gd и Co в магнитном поле.

3. Установлено, что определённую роль в формировании магнитной анизотропии в аморфных плёнках Gd-Co играют неоднородности химического состава. В модели неоднородной плёнки, включающий основной слой с перпендикулярной анизотропией и дополнительный (поверхностный) слой с плоскостной анизотропией, впервые дано количественное описание наблюдающимся на эксперименте зависимостям параметров конуса ОЛН от температуры и напряжённости магнитного поля, а также закономерностям спиновой переориентации. Показано, что неоднородности типа «компенсационная поверхность» приводят к аномалиям в температурной зависимости вращающего момента в непосредственной близости от температуры компенсации. На этой основе предложен новый высокочувствительный способ регистрации неоднородностей состава аморфных плёнок Gd-Co.

4. Показано, что в искусственных ферромагнитных структурах типа Gd/Co наблюдаются индуцированные магнитным полем переходы из коллинеарной магнитной фазы в угловую магнитную фазу. Для регистрации таких переходов целесообразно использовать меридиональный эффект Керра, дающий информацию о характеристиках кобальтовой компоненты слоистой системы. Найдено, что критическое поле спин-ориентационного перехода имеет немонотонную температурную зависимость с минимумом около температуры компенсации и тем самым демонстрирует сходство с аналогичной характеристикой кристаллических ферромагнетиков.

5. Впервые установлены закономерности перестройки спектра ферромагнитного резонанса искусственных слоистых ферромагнетиков Gd/Co в области температур, включающей температуру компенсации T_k . Показано, что при температурах ниже и выше T_k в спектре присутствует одна резонансная линия. Выше T_k она связана со слоями Co. Вблизи T_k резонансный спектр имеет сложный характер, что может быть обусловлено нарушением коллинеарности магнитной структуры в высокочастотном магнитном поле.

6. Представлены примеры практического применения аморфных плёнок Gd-Co как составляющей материала для элементов памяти с магнитной записью и магниторезистивным считыванием информации и многослойных плёнок РЗ/ПМ как источников магнитного смещения в материалах со спин-вентильным магниторезистивным эффектом.

Основные публикации по теме диссертации

1. Васьковский В.О., Кандаурова Г.С., Свалов А.В., Герасимов Е.Г. Намагничивание аморфных пленок типа Gd-Co вблизи компенсации. Аморфные пленочные сплавы переходных и редкоземельных металлов. - Красноярск, ИФ СО АН СССР, 1988, с. 163-181.
2. Васьковский В.О., Кандаурова Г.С., Свалов А.В. Магнитный носитель. - Патент РФ №2023320. Приор. от 13.02.89, опубл. БИ РФ, 1994, №21, с. 158.
3. Васьковский В.О., Кандаурова Г.С., Герасимов Е.Г., Осадченко В.Х., Свалов А.В., Пампура Е.М. Спиновая переориентация в ферримагнитных неоднородных пленках типа Gd-Co. - ФММ, 1991, №2, с. 85-91.
4. Sorokin A.N., Svalov A.V. Magnetic studies of the homogeneity of ferrimagnetic amorphous films. - Vacuum, 1995, v.46, №2, p. 113-115.
5. Svalov A.V., Bepalko O.I. Rotational magnetic anisotropy in amorphous Gd-Co films - J. Magn. Magn. Mater., 1995, v.148, p. 134-135.
6. Vas'kovskiy V.O., Svalov A.V. Magnetic and magnetoresistive properties of synthesized ferrimagnetic $\text{Fe}_{15}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{65}/\text{GdCo}$. - J. Magn. Magn. Mater., 1995, v.148, p. 321-322.
7. Свалов А.В., Кандаурова Г.С., Беспалько О.И. Вращающаяся анизотропия в аморфных пленках Gd-Co – ФММ, 1995, т.80, вып.1, с. 65-69.
8. Vas'kovskiy V.O., Svalov A.V., Ryazantsev A.A. Amorphous gadolinium-cobalt films with in-plane anisotropy for magnetoresistive sandwiches. – J. Magn. Magn. Mater., 1996, v.156, p. 291-292.
9. Васьковский В.О., Гарсиа Д., Свалов А.В., Эрнандо А., Баскес М., Курляндская Г.В., Горбунов А.В. Межслойная связь и особенности магнитной компенсации в многослойных пленках типа Gd/Co. – ФММ, 1998, т.86, вып.2, с. 48-53.
10. Vas'kovskiy V.O., Svalov A.V. Magnetic structure, hysteretic characteristics and magnetic anisotropy of multilayered Gd/Co films, Proceedings of the Tenth International Symposium on Magnetic Anisotropy and Coercivity in Rare-Earth Transition Metal Alloys, 1998, Dresden, 125-128.
11. Sorokin A.N., Svalov A.V. Temperature dependence of the torque and galvanomagnetic effects in layered amorphous Gd-Co films – Proceedings of Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-99), 1999, p. 151-154.
12. Vas'kovskiy V.O., Svalov A.V., Sorokin A.N., Krapivin P.V., Zinin A.V. Effect of heat treatment on the magnetic compensation state of amorphous Gd-Co and layered Gd/Co films. – J. Alloys Comp., 1999, v.285, p. 238-241.

13. Vas'kovskiy V.O., Svalov A.V., Vázquez M., Hernando A., Kurlyandskaya G.V., García D., Gorbunov A.V. Magnetic anisotropy peculiarities of Gd/Co films near the magnetic compensation state – J. Magn. Magn. Mater., 1999, v.203, p. 295-297.
14. Меренков Д.Н., Чижик А.Б., Гнатченко С.Л., Баран М., Шимчак Р., Васьковский В.О., Свалов А.В. Фазовая Н-Т диаграмма многослойной пленки Gd/Si/Co с ферримагнитным упорядочением слоев. – ФНТ, 2001, т.27, №2, с. 188-195.
15. Svalov A.V., Barandiarán J.M., Vas'kovskiy V.O., Kurlyandskaya G.V., Lezama L., Bebenin N.G., Gutiérrez J., Schmool D. Ferromagnetic resonance in Gd/Co multilayers – Chin. Phys. Lett., 2001, v.18, №7, p. 973-975.
16. Svalov A.V., Vas'kovskiy V.O., Barandiarán J.M., Bebenin N.G., Kurlyandskaya G.V., Gorbunov A.V., Lezama L., Gutiérrez J., Schmool D. Peculiarities of ferrimagnetism of Gd/Co multilayers - J. Alloys and Comp., 2001, v.327, №1-2, p. 5-10.
17. Gorbunov A.V., Vas'kovskiy V.O., Svalov A.V. Two mechanisms of the influence of layered structure parameters on magnetic properties of Gd/Co films - Phys. Met. Metall, 2001, v.91, Suppl.1, S60-S64.
18. Патрин Г.С., Васьковский В.О., Великанов Д.А., Свалов А.В. Влияние магнитного поля на межслоевое взаимодействие в пленках $(\text{Co/Si/Gd/Si})_n$ - Письма в ЖЭТФ, 2002, т.75, №3, с. 188-190.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chaudhari P., Cuomo J.J., Gambino R.J. Amorphous metallic films for magneto-optical applications. - Appl. Phys. Lett., - 1973, v. 22, №7, p. 337-339.
2. Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance. Fundamentals and Industrial Applications. Editor: U. Hartman. -Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York 2000, 320 p.
3. Глазер А.А., Константинова И.Ю., Потапов А.П., Тагиров Р.И. Температурная зависимость вращающейся анизотропии в закритических пленках сплавов железо-никель. - ФММ, 1972, т.33, вып.5, с. 946-953.
4. Hasegawa R. Static bubble domain properties of amorphous Gd-Co films. - J. Appl. Phys., 1974, v. 45, №7, p. 3109-3112.

Частичная поддержка работы осуществлена фондом «The U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF)», грант №.REC-005.

Подписано в печать _____. Формат 60×84 1/16
Бумага типографская. Объём 1 п.л. Тираж 100. Заказ № ____
Екатеринбург, К-83, пр. Ленина, 51. Типолаборатория УрГУ.